

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐祎凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响

宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全

(浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300)

摘要: UV-B 辐射对凋落物分解过程的影响已成为全球变化生态学研究中的前沿和热点问题之一。采用分解袋法对自然和 UV-B 辐射滤减两种环境下亚热带 6 种代表性树种(杉木、马尾松、木荷、香樟、青冈和甜槠)凋落叶氮、磷元素的释放动态进行了研究。结果表明, 凋落叶氮元素的动态表现为直接富集、释放-富集和释放-富集-释放 3 种模式, 磷元素的动态表现为直接释放、富集-释放-富集和无明显变化 3 种模式。与对照相比, UV-B 辐射滤减显著延缓了甜槠凋落叶氮元素及青冈和甜槠凋落叶磷元素的释放 ($P < 0.05$), 但促进了香樟凋落叶磷元素的释放 ($P < 0.05$), 对其他树种凋落叶的氮或磷释放无显著影响。凋落叶的初始氮含量和 C/N 比值不能解释氮释放动态, C/P 比值可以部分解释磷的释放。全球环境变化背景下 UV-B 辐射在湿润亚热带地区森林生态系统过程中的作用尚需进一步认识和理解。

关键词: UV-B 辐射; 凋落叶分解; 亚热带; 氮磷释放; 养分循环

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0545-06

Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China

SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, YU Shu-quan

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture & Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract: The release of nitrogen and phosphorus from leaf litter of six representative species, *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana*, *Schima superba*, *Cinnamomum camphora*, *Cyclobalanopsis glauca* and *Castanopsis eyeri*, was investigated with litterbag method under ambient and reduced UV-B radiation (22.1% below ambient) treatments in subtropical region. The results showed that, the N dynamics exhibited three patterns: immobilization, mineralization-immobilization and mineralization-immobilization-mineralization. P dynamics also exhibited three different patterns: mineralization, immobilization-mineralization-immobilization and no large change. Compared with ambient treatment, the reduced treatment significantly delayed the N release from *C. eyeri* and P release from both *C. glauca* and *C. eyeri* ($P < 0.05$), but significantly stimulated P release from *C. camphora* ($P < 0.05$). The initial N contents and C:N ratios can not account for the N dynamics during leaf litter decomposition. The C:P ratios can partly explain the P dynamics during decomposition. The more works need to be done to better understand the role of UV-B radiation in the forest ecosystem in humid subtropical China under global environment change.

Key words: UV-B radiation; leaf litter decomposition; subtropical region; release of N and P; nutrient cycle

森林凋落物分解是陆地生态系统物质循环和能量转换的主要途径,对森林生态系统的生产力和碳估算具有重要的科学意义^[1,2]。由大气臭氧层变薄引起的 UV-B 辐射增强将通过影响凋落物分解过程中养分元素的释放而对生态系统的营养循环、初级生产力和碳储量产生深远影响^[3,4],已成为当前全球变化生态学和生物地球化学循环研究中的前沿和热点问题之一^[5-8]。氮和磷是陆地生态系统植被最重要的 2 个限制元素^[9],植物吸收的氮和磷超过 90% 来源于养分的循环^[10]。因此,研究 UV-B 辐射对凋落物氮、磷元素释放动态的影响,对于全面认识和评估 UV-B 辐射对陆地生态系统生产力的潜在影响具有重要的科学意义和理论价值。

目前已开展的相关研究绝大多数在干旱半干旱的温带草原进行,研究对象多为草本植物的凋落物^[11-15],内容主要集中在 UV-B 辐射对分解速率的影响以及作用机制的探讨,而关于 UV-B 辐射对凋落物养分释放动态影响的研究则鲜见报道^[11,16],对湿润亚热带地区森林凋落物养分释放影响的研究尚未开展^[7,17,18]。鉴于此,本研究采用 UV-B 辐射滤减方法,分析了 UV-B 辐射对我国亚热带地区广泛分

收稿日期: 2011-04-11; 修订日期: 2011-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800152, 31070440); 浙江省自然科学基金项目(Y5090007); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB950702, 2010CB428503); 科技部重大基础性项目(2007FY110300-08); 浙江农林大学科研启动基金项目(2007FR075)

作者简介: 宋新章(1976~),男,博士,副教授,主要研究方向为全球生态、森林生态、土壤生态学, E-mail: xzsong@126.com

布的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、木荷 (*Schima superba*)、香樟 (*Cinnamomum camphora*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 和甜槠 (*Castanopsis eyeri*) 等 6 个代表性树种凋落叶氮、磷元素释放的影响, 以期为深入理解和评估 UV-B 辐射变化对我国亚热带森林生态系统养分循环过程的影响提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于浙江省临安市平山村浙江农林大学野外科研试验基地内, 地理坐标为 119°42'E, 30°14'N。该区地处中亚热带季风气候区的北缘, 四季分明, 温和湿润, 热量丰富, 雨量充沛, 年均降水量在 1420 mm 左右, 年均气温 15.6°C, 有效积温为 2696.2°C, 无霜期 230 d 左右。土壤为黄红壤。

1.2 研究方法

1.2.1 UV-B 辐射环境模拟

UV-B 辐射环境设置 UV-B 辐射滤减和自然光照(对照)共 2 个梯度环境。UV-B 辐射滤减环境模拟采用国际上同类研究通用的聚酯薄膜法。该方法通过聚酯薄膜滤减掉部分 UV-B, 造成低于周围 UV-B 辐射的环境, 以研究 UV-B 辐射滤减和对照 2 种辐射环境下的凋落物分解动态。该方法默认 UV-B 辐射的生物效应随辐射强度线性增加, 其结果最终用来说明未来 UV-B 辐射增强对分解造成的可能影响^[6]。该方法模拟产生的 UV-B 辐射均匀, 且随太阳光照的日变化和季节变化而变化, 操作简便且成本较低因而受到广泛应用^[5,13,19]。

具体方法为在 UV-B 滤减处理样地正上方铺设 125 μm 厚的聚酯薄膜(佛山杜邦鸿基薄膜有限公司), 但样地四周保持通透, 以滤除 UV-C 和部分 UV-B 但透过 UV-A, 同时又与对照样地的环境因子保持一致。2 个月更换一次薄膜以防老化。用双通道 UV-B 辐照计(北京师范大学光电仪器厂)测定聚酯薄膜下的 UV-B 辐射强度, 经 Caldwell^[20] 公式转换为生物有效辐射。经测定, UV-B 辐射强度在滤减环境下比自然环境减弱了 22.1%。同时根据每次降雨的降雨量, 往 UV-B 滤减样地内喷施等量的水。每 2 个月测定一次 2 个样地 0~15 cm 处的土壤含水率, 统计结果表明 2 个样地的土壤含水率差异不显著 ($P > 0.05$)。

1.2.2 凋落叶收集与分解

2008 年 10 月, 在天目山国家级自然保护区内

收集 6 个代表性树种(2 个针叶树种, 4 个阔叶树种)新近凋落的鲜叶, 带回实验室自然风干, 装入由孔径为 1.0 mm × 1.5 mm 的尼龙网制成的分解袋中, 袋大小为 15 cm × 15 cm, 每袋约 10 g 凋落叶, 做好标记。同时分析测定凋落叶的含水率和初始 C、N、P 和木质素含量。于 12 月将凋落叶分解袋分别放入 UV-B 辐射滤减和对照模拟环境的样地内, 放置时贴近地表模拟凋落物分解的自然状况。在放置分解袋前先对分解样地进行整地, 以保证样地土壤基质的一致性。从 2 月起每 2 个月收回一次分解袋, 每次每个处理取 3 袋(即 3 个重复), 带回实验室, 清除凋落物表面附着的泥沙和其他杂质, 在 80°C 烘箱中烘干至恒量, 测定剩余凋落物的质量, 粉碎后测定 N、P 含量。

1.2.3 化学元素分析

木质素含量用 Van Soest 中性洗涤纤维(NDF)及酸性洗涤纤维(ADF)方法测定; 碳含量用重铬酸钾容量法-外加热(油浴加热)法测定; 氮和磷含量分别用半微量凯氏法和钼锑抗比色法测定。

1.3 数据处理

凋落物分解速率采用 Olson^[21] 指数模型计算:

$$X_t/X_0 = e^{-kt}$$

式中, X_t 为时间 t 时(a)的干质量; X_0 表示凋落物的初始干质量; k 为凋落物的年分解速率。

养分元素的释放用元素剩余率(E)表示^[11,16], 计算公式为:

$$E = [(M_t \times c_t) / (M_0 \times c_0)] \times 100\%$$

式中, M_0 为放置分解袋时袋内凋落叶样品的干质量(g); c_0 为初始养分含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); M_t 为 t 时刻分解袋内凋落叶的干质量(g); c_t 为 t 时刻凋落叶的养分含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。 $E < 100\%$ 时表示元素净释放, $> 100\%$ 时表示元素出现了富集。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同树种凋落叶初始化学成分的差异和 N、P 释放率在 2 种 UV-B 辐射环境下的差异。统计分析用 SPSS 13.0 完成。

2 结果与分析

2.1 凋落叶的初始化学组成

6 种凋落叶的初始化学组成见表 1。由表 1 可见, 杉木的 N 含量在 6 个树种中最低, 导致其 C:N 和木质素:N 在 6 个树种中最高。木荷的 N 含量在 6 个树种中最高, 导致其 C:N 最低。香樟的 P 含量最低, 导致其 C:P 最大。青冈的 P 含量最高, 而 C 和木质素含量

最低,导致其 C:P 和木质素:N 最小. 统计分析表明各树种间的 N、P、C、C:N、木质素:N 和 C:P 差异显著.

特别是作为凋落叶分解快慢决定性因子之一的木质素含量在各树种间均存在显著差异.

表 1 6 种凋落叶的初始化学组成¹⁾

Table 1 Initial chemical composition of 6 types litter

树种	N/%	P/%	C/%	木质素/%	C:N	木质素:N	C:P
杉木 <i>C. lanceolata</i>	0.40(0.01)d	0.06(0.00)c	49.47(0.48)a	33.15(0.23)b	124.25(1.21)a	83.26(0.57)a	899.05(8.79)a
马尾松 <i>P. massoniana</i>	0.72(0.03)ab	0.10(0.01)b	46.19(0.93)c	27.85(1.09)e	64.21(1.29)d	38.71(1.51)e	479.37(9.65)d
木荷 <i>S. superba</i>	0.74(0.04)a	0.06(0.00)c	42.74(0.62)d	29.75(0.55)d	57.61(0.84)e	40.09(0.74)d	720.01(10.53)b
香樟 <i>C. camphora</i>	0.40(0.03)d	0.05(0.00)c	46.14(0.16)c	32.04(0.17)c	115.12(0.41)b	79.94(0.42)b	907.80(3.22)a
青冈 <i>C. glauca</i>	0.67(0.02)b	0.14(0.00)a	42.08(0.23)d	20.83(0.13)f	62.87(0.34)d	31.12(0.19)f	309.84(1.70)e
甜槠 <i>C. eyeri</i>	0.57(0.05)c	0.10(0.01)b	47.85(0.97)b	37.90(0.27)a	84.12(1.71)c	66.64(0.47)c	495.99(10.07)c

1) 同列相同字母表示没有显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 氮元素释放动态

由图 1 可见,杉木和木荷在分解的前 8 个月均总体上表现出 N 元素的释放现象,随后开始富集. 马尾松则经过前 4 个月的短暂释放后即开始富集. 香樟的 N 元素动态表现出剧烈的波动,在经历初期短暂的释放后开始富集,随后又开始了释放. 青冈和甜槠在整个分解过程中除偶尔发生轻微的 N 释放外,总体上表现为 N 富集. 6 种凋落叶的 N 元素在 2 种 UV-B 辐射环境下的释放动态可归结为 3 种模式:① 释放-富集模式,杉木、马尾松和木荷的凋落叶的 N 元素均在分解初期出现了释放,但接着发

生了富集现象,直至试验结束. ② 富集模式,青冈和甜槠凋落叶在 UV-B 辐射滤减环境下整个分解过程都表现为富集状态,但在对照环境下均发生过短暂的释放现象. ③ 释放-富集-释放模式,香樟的 N 元素动态表现为此模式. 在 1 a 的分解过程中,虽然 6 个树种的 N 元素表现出或释放或富集等动态变化,但最大释放率未超过 50%,最大富集率多数达到 200% 左右. 方差分析结果显示,除显著延缓了甜槠凋落叶 N 元素的释放外 ($P < 0.05$),UV-B 辐射滤减对其他 5 种凋落叶 N 元素的释放无显著影响.

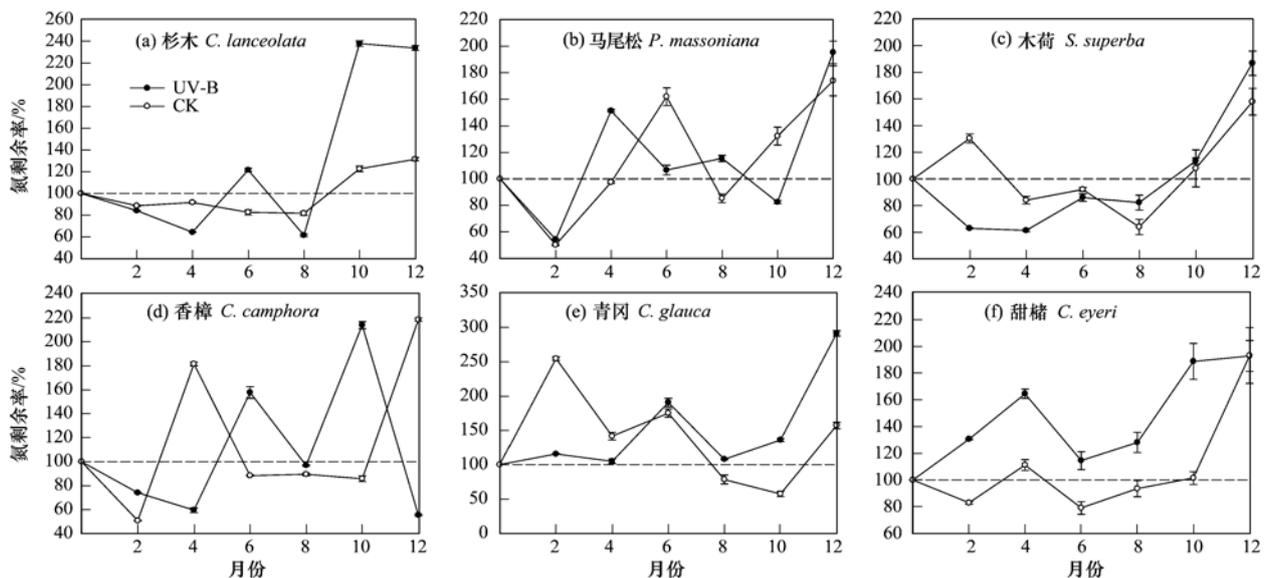


图 1 6 树种凋落叶分解过程中氮的释放

Fig. 1 Release rates of N during leaf litter decomposition of 6 species

2.3 磷元素释放动态

由图 2 可见,杉木和香樟的 P 元素在经历初期短暂的富集后开始释放,随后又转为富集过程. 马尾松、青冈和甜槠总体上表现为 P 元素的净释放,但

分解后期 UV-B 辐射滤减处理下均呈现出富集的趋势. 木荷的 P 元素含量在整个分解过程中比较稳定,并表现出轻微的释放. 6 种凋落叶的 P 元素在两种 UV-B 辐射环境下的释放动态亦可归结为 3 种模

式:①直接释放,马尾松、青冈和甜槠 3 种凋落叶的 P 元素在分解过程中表现为净释放,但 UV-B 辐射滤减显著延缓了青冈和甜槠凋落叶的 P 元素释放进程($P < 0.05$),且使马尾松和青冈在分解末期出现了轻微的富集现象.②富集-释放-富集模式,杉木和香樟凋落叶的 P 元素在试验开始时表现出短暂的富集,随后开始了释放,但近试验结束时又出现了富集现象,而且香樟凋落叶在 UV-B 辐射滤减环境

下表现出更强的释放趋势.③无明显变化,木荷凋落叶的 P 元素在整个分解过程中没有发生明显的释放或富集现象.在 1 a 分解期间,6 个树种的 P 元素最大释放率多数达到 25% 左右,最大未超过 50%,最大富集率多数达到 120% 左右.统计结果表明,UV-B 辐射显著影响到青冈、甜槠和香樟 P 元素的释放动态($P < 0.05$),但对杉木、马尾松和木荷 P 元素的释放无显著影响.

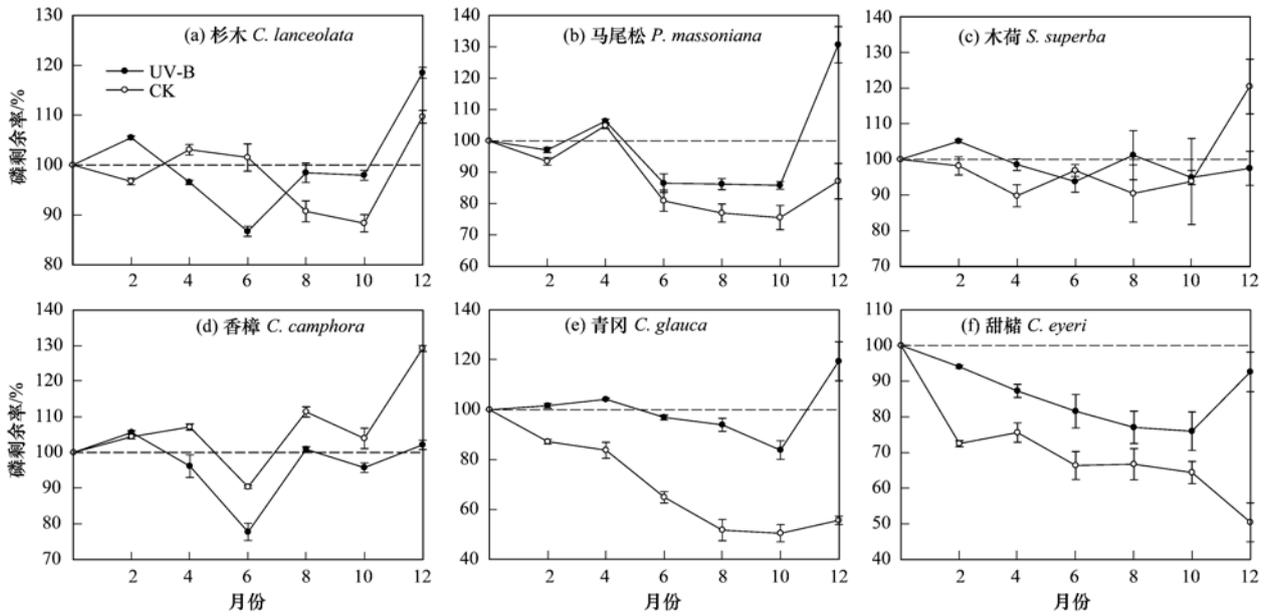


图 2 6 树种凋落叶分解过程中磷的释放

Fig. 2 Release rates of P during leaf litter decomposition of 6 species

3 讨论

森林凋落物在分解过程中养分元素的富集与释放有明显的阶段性特征,并与凋落物的化学组成有关,也与养分本身特性有关,主要表现为 3 种释放模式:①淋溶-富集-释放;②富集-释放;③直接释放^[22,23].低品质凋落物 N、P 含量较少,而木质素等难分解的化合物含量较多,其在分解前期(可达 2~3 a)往往会从环境中固定养分,特别是 N、P 养分^[24,25],高品质凋落物因 N、P 含量较多则可在较短时间内就释放出养分. Parton 等^[2]认为 N 的释放主要取决于凋落物的初始 N 含量能否满足微生物分解者对 N 的需求, N 含量高的凋落物能满足分解者对 N 的需求从而较快释放出 N; N 含量低的凋落物不能满足分解者对 N 的需求,分解者须从环境中固定外源 N. 一般情况下分解过程中 N 的富集是真菌将 N 从土壤向凋落物转移的结果^[10,26]. Berg 等^[27]认为凋落物氮含量在 0.3%~1.4% 范围内时出现

氮的固定,在 0.6%~2.8% 范围内则发生氮的释放,但 2 个范围有较大的重叠,说明还可能与其它因素有关.

此外,凋落物的 C/N 比值也被认为是决定 N 元素释放与富集的一个重要因子.在 C/N 比值高于 5~15 时会一直发生 N 元素的富集,低于 5~15 时才会开始释放^[1,25]. 本研究中,虽然 6 个树种凋落叶的 N 含量在 0.40%~0.74% 之间, C/N 比值在 57.61~124.25 之间(表 1),却表现出 3 种不同的释放模式(图 1),说明在湿润的亚热带地区,凋落叶 N 释放是一个复杂的过程,并不单由初始的 N 含量和 C/N 比决定,同时还受到其他因子的综合作用.

值得注意的是,杉木、马尾松、木荷和香樟 4 个树种凋落叶在分解初期均表现出 N 释放,这可能与该地区较强的降水导致的淋溶作用有关,至试验结束时又表现出较强的 N 富集趋势可能是因为经过初期的淋溶过程后,分解进入生物分解据主导地位的阶段,这时凋落叶 N 含量因淋溶作用而降低,不

能满足分解者的需求,促使分解者(主要是真菌)开始从土壤中富集 N. 图 1 还显示出在 UV-B 滤减环境下 6 树种凋落叶 N 富集的程度更强,如青冈甚至接近于 300%, Brandt 等^[12]也发现 UV 辐射减弱了凋落物中 N 的富集. 出现这种现象的原因可能在于对照环境下相对较强的 UV-B 辐射抑制了真菌的组成和活性^[28~30],从而削弱了真菌富集 N 的能力. 如 Moody 等^[31]发现 UV-B 辐射导致凋落物分解过程中 5 种真菌的孢子萌发能力下降了 22% ~ 44%, Pancotto 等^[16]也观测到 UV-B 辐射降低了凋落物分解过程中青霉菌(*Penicillium chrysogenum*)的移殖能力. 笔者下一步也将开展这方面的试验来印证这一推断.

凋落物的 C/P 比值被认为是决定 P 元素释放与富集的一个重要因子,其阈值范围一般为 200 ~ 480^[32,33]. 本研究中,马尾松、青冈和甜槠凋落叶的 C/P 比值低于或接近于 480 的上限值,因而在分解过程中表现为 P 的净释放,杉木和香樟凋落叶的 C/P 比值远远高于 480 的上限值,因而在分解过程中最初表现为 P 的富集,这同上述理论基本上是一致的. UV-B 辐射滤减显著延缓了青冈和甜槠凋落叶的 P 释放进程,但却促进了香樟凋落叶的 P 释放,这可能同香樟凋落叶 P 含量在 6 树种中相对最低, C/P 相对最高有关. 这一结果表明 UV-B 辐射增强虽然会加快湿润亚热带地区部分树种凋落物的 P 释放,但因具体树种而异.

UV-B 辐射影响分解过程的生态学意义在于它与营养周转和土壤肥力供应有密切的联系. 本研究中,UV-B 辐射虽然显著加快了 6 种凋落叶的分解速率($P < 0.01$, 另文发表),但只是促进了甜槠凋落叶 N 的释放及青冈和甜槠凋落叶 P 的释放,抑制了香樟凋落叶的 P 释放,对其他树种凋落叶的 N 或 P 释放无明显影响,因此,对于未来全球环境变化情景下 UV-B 辐射变化在我国湿润亚热带地区森林生态系统过程和功能中的作用,尚需开展进一步的深入研究加以认识和理解.

4 结论

(1) 在为期 1 a 的分解过程中,亚热带 6 种代表性树种凋落叶 N 元素的动态表现为直接富集、释放-富集和释放-富集-释放 3 种模式, P 元素的动态表现为直接释放、富集-释放-富集和无明显变化 3 种模式.

(2) UV-B 辐射促进了甜槠凋落叶的 N 释放,对其他 5 个树种凋落叶的 N 释放无明显影响;加快了

青冈和甜槠凋落叶的 P 释放,对香樟凋落叶的 P 释放起到抑制作用,对其他 3 个树种凋落叶的 P 释放无明显影响.

参考文献:

- [1] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, *et al.* The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization [J]. *Science*, 2008, **321**(5889): 684-486.
- [2] Parton W, Silver W L, Burke I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition [J]. *Science*, 2007, **315**(5810): 361-364.
- [3] Ballaré C L, Caldwell M M, Flint S D, *et al.* Effects of solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. Patterns, mechanisms, and interactions with climate change [J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, **10**(2): 226-241.
- [4] Li F R, Peng S L, Chen B M, *et al.* A meta-analysis of the responses of woody and herbaceous plants to elevated ultraviolet-B radiation [J]. *Acta Oecologica*, 2010, **36**(1): 1-9.
- [5] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(10): 4618-4622.
- [6] Flint S D, Ryel R J, Caldwell M M. Ecosystem UV-B experiments in terrestrial communities: a review of recent findings and methodologies [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **120**(1-4): 177-189.
- [7] 张慧玲, 宋新章, 袁建国, 等. 增强紫外线-B 辐射对凋落物分解的影响研究综述 [J]. *浙江林学院学报*, 2010, **27**(1): 134-142.
- [8] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等. UV-B 辐射增强与秸秆施用对大豆田土壤呼吸的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1638-1642.
- [9] Vitousek P M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests [J]. *Ecology*, 1984, **65**(1): 285-298.
- [10] Chapin F S III, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 2002. 129-144.
- [11] Brandt L A, King J Y, Hobbie S E, *et al.* The role of photodegradation in surface litter decomposition across a grassland ecosystem precipitation gradient [J]. *Ecosystems*, 2010, **13**(5): 765-781.
- [12] Brandt L A, King J Y, Milchunas D G. Effects of ultraviolet radiation on litter decomposition depend on precipitation and litter chemistry in a shortgrass steppe ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(10): 2193-2205.
- [13] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation [J]. *Nature*, 2006, **442**(7102): 555-558.
- [14] Moody S A, Paul N D, Björn L O, *et al.* The direct effects of UV-B radiation on *Betula pubescens* litter decomposing at four

- European field sites [J]. *Plant Ecology*, 2001, **154**(1-2): 29-36.
- [15] Rozema J, Tosserams M, Nelissen H J M, *et al.* Stratospheric ozone reduction and ecosystem processes: enhanced UV-B radiation affects chemical quality and decomposition of leaves of the dune grassland species *Calamagrostis epigeios* [J]. *Plant Ecology*, 1997, **128**(1-2): 284-294.
- [16] Pancotto V A, Sala O E, Cabello M, *et al.* Solar UV-B decreases decomposition in herbaceous plant litter in Tierra del Fuego, Argentina: Potential role of an altered decomposer community [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(10): 1465-1474.
- [17] 宋新章, 江洪, 张慧玲, 等. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4414-4423.
- [18] 王海云, 李元, 祖艳群. UV-B 辐射对植物残体分解的影响及其机理 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(增刊): 443-446.
- [19] Day T A, Zhang E T, Ruhland C T. Exposure to solar UV-B radiation accelerates mass and lignin loss of *Larrea tridentata* litter in the Sonoran Desert [J]. *Plant Ecology*, 2007, **193**(2): 185-194.
- [20] Caldwell M M. Solar ultraviolet radiation and the growth and development of higher plant [A]. In: Giese A C (ed.). *Photophysiol* [M]. New York: Academic Press, 1971.
- [21] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems [J]. *Ecology*, 1963, **44**(2): 322-331.
- [22] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(9): 1534-1544.
- [23] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. *林业科学*, 2006, **42**(4): 93-100.
- [24] Gallardo A, Merino J. Nitrogen immobilization in leaf litter at two Mediterranean ecosystems of SW Spain [J]. *Biogeochemistry*, 1992, **15**(3): 213-228.
- [25] Mcclaugherty C A, Pastor J, Aber J D, *et al.* Forest litter decomposition in relation to soil nitrogen dynamics and litter quality [J]. *Ecology*, 1985, **66**(1): 266-275.
- [26] Mary B, Recous S, Darwis D, *et al.* Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil [J]. *Plant and Soil*, 1996, **181**(1): 71-82.
- [27] Berg B, Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter [J]. *Ecology Bull*, 1981, **33**: 163-178.
- [28] Duguay K J, Klironomos J N. Direct and indirect effects of enhanced UV-B radiation on the decomposing and competitive abilities of saprobic fungi [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, **14**(2): 157-164.
- [29] Newsham K K, McLeod A R, Roberts J D, *et al.* Direct effects of elevated UV-B radiation on the decomposition of *Quercus robur* leaf litter [J]. *Oikos*, 1997, **79**(3): 592-602.
- [30] Gehrke C, Johanson U, Callaghan T V, *et al.* The impact of enhanced ultraviolet-B radiation on litter quality and decomposition processes in *Vaccinium* leaves from the Subarctic [J]. *Oikos*, 1995, **72**(2): 213-222.
- [31] Moody S A, Newsham K K, Ayres P G, *et al.* Variation in the responses of litter and phylloplane fungi to UV-B radiation (290-315 nm) [J]. *Mycological Research*, 1999, **103**(11): 1469-1477.
- [32] Gosz J R, Likens G E, Bormann F H. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire [J]. *Ecological Monographs*, 1973, **43**(2): 173-191.
- [33] Dziadowiec H. The decomposition of plant litterfall in a oak-linden-hornbeam forest and an oak-pine mixed forest of the Bialoweza national Park [J]. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 1987, **56**: 169-185.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@reeces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@reeces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行